УДК 621.391

А.В. БРЕЗГУНОВ, канд. техн. наук, доцент, НТУ “ХПИ”,
С.С. КОЗЛОВ, аспирант, НТУ “ХПИ”

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ШУМОВОЙ КОМПОНЕНТЫ ОТКЛИКА КОРРЕЛЯТОРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕГАРМОНИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ КОЛЕБАНИЙ

У статті проведено обчислення значення шумової компоненти відгуку корелятора при використанні негармонійних опорних коливань.

В статье проведено вычисление значения шумовой компоненты отклика коррелятора при использовании негармонических опорных колебаний.

In the article the calculation of value of noise komponenty of response of correlating is conducted at the use of inharmonious supporting vibrations.

Для уменьшения влияния шумов каналов связи $\xi(t)$ на решение о переданном сигнале $S(t)$ в системах связи, локации и др. широко используются корреляторы [1, 2]. Уменьшение значения шумовой компоненты отклика коррелятора может быть получено при замене генератора в корреляторе с генератором опорного гармонического сигнала $S(t)$ на генератор периодической последовательности биполярных прямоугольных импульсов $S_П(t)$ длительностью равной полупериоду $S(t)$ («меандровой копии») на величину до 10% [1].

Цель статьи – показать возможность вычисления значения шумовой компоненты отклика коррелятора при воздействии на сигнал $S(t)$ флуктуационного гауссового шума $\xi(t)$ с центральной частотой ω_0 [2], если только начальные фазы шума $\varphi_{0\xi(t)} \pm k\pi$ (k=0,1,2,..) и переданного сигнала φ_0, рассматриваемые на малом временном интервале Δt_i, не совпадают.

Пусть в канал связи передаётся сигнал $S(t)=A\cdot sin(\omega_o t+\varphi_0)$ длительности $T_И$, и на вход схемы на основе коррелятора 1, с генератором опорного гармонического сигнала $S(t)$, и коррелятора 2 с генератором «меандровой копии» $S_П(t)$ опорного сигнала при воздействии на сигнал $S(t)$ флуктуационного гауссового шума $\xi(t)$ поступает искажённый сигнал $S^*(t)=S(t)+\xi(t)$, а на выходах корреляторов 1 и 2 получаем отклики:

$$Y_{1i} = a\int_0^{Tи} [S^2(t) + S(t)\cdot\xi(t)]\, dt \qquad (1)$$

$$Y_{2i} = a\int_0^{Tи} [S(t)\cdot S_П(t) + S_П(t)\cdot\xi(t)]\, dt. \qquad (2)$$

Используя $\Delta E_i = Y_{1i} - Y_{2i}$, полученное для трёх пар опорных сигналов $S(t)$ и $S_П(t)$ с начальными фазами φ_{0i}, отличающимися от переданного сигнала по фазе на φ_{01}=0°, φ_{02}=90°, $\varphi_{03}=x$ (у нас x=11,25°) и значение шумовой компоненты отклика коррелятора при φ_{02} =90°, вычислим значение второго слагаемого в (1), т.е. значение шумовой компоненты отклика коррелятора.

Пусть флуктуационный гауссов шум $\xi(t)$ с центральной частотой ω_0 (без разрывов или скачков фазы) изменяется по частоте в полосе пропускания Π относительно ω_0 на величину $\pm\Delta\omega_0(t)$ и имеет амплитуду $B(t)$ (Π/ω_0 <<1) [2]:

$$\xi(t) = B(t)\cdot sin[(\omega_0 + \Delta\omega_0(t))t + \varphi_{\xi i}]. \qquad (3)$$

Т.к. $\xi(t)$ – узкополосный шум, то из-за небольшого значения набега фазы φ на малом интервале времени $\Delta t_i \rightarrow 0$ при изменяющейся частоте $\omega_0 \pm \Delta\omega_0(t)$ в выражении (3) будем считать, что $\pm\Delta\omega_0(t)$ незначительно влияет на конечный результат вычисления (1) и этим изменением можно пренебречь, учитывая лишь изменение фазы $\varphi_{\xi i}$. Т.е. на малом интервале времени Δt_i

$$\xi(t)\,|_{\Delta ti} = B_i\cdot sin(\omega_o t + \varphi_{\xi i}), \qquad (4)$$

где B_i средние значение амплитуды сигнала шума $\xi(t)$, на интервале времени Δt_i. Тогда за длительность $T_И = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \ldots + \Delta t_N$:

$$\xi(t) = B_1\cdot sin(\omega_o t + \varphi_{\xi 1}) + B_2\cdot sin\,(\omega_o t + \varphi_{\xi 2}) + \ldots + B_N\cdot sin(\omega_o t + \varphi_{\xi N}). \qquad (5)$$

Пусть амплитуда $S_\Pi(t)$ опорного сигнала равна значению 0,7071067 от амплитуды опорного сигнала $S(t)$, тогда энергии первых членов суммы в (1) и (2) будут равны. Отличия значений (1) и (2) будут определяться их вторыми членами суммы, т.е. значениями энергий E_1 и E_2 шумов, результат вычисления которых за Δt_i при использовании выражения (4) помещён в таблицу (для удобства за Δt_i=1с, множители a=1 и B_i=1), для различных $\pm\varphi_{\xi i}$ от 0° до 90° (при $\pm\varphi_{\xi i} + \pi$ знак будет отрицательным). E_3 показывает значение Y_1, равное энергии шума E_3 (т.к. при φ_{02}=90° первый член суммы в (1) равен нулю.

Таблица. Результаты вычисления шумов

$\varphi_{\xi i}$,град.	ΔE_1	E_1	E_2	E_3	ΔE_2	ΔE_3
0	0	0,5	0,5	0	0,5	0,0073053
11,25	0,0073053	0,4903926	0,4830873	0,0954516	0,0078616	0
22,5	0,022338	0,4619398	0,4397014	0,1913417	0,0196268	0,0073053
33,75	0,0143013	0,4157348	0,40144	0,2777851	0,0277551	0,0223383
45	0,0083633	0,3535533	0,34519	0,3535533	0,0083633	0,0143013
56,25	0,0277551	0,2777851	0,2492908	0,4157348	0,0143013	0,0083633
67,5	0,0196268	0,1913417	0,1717149	0,4619398	0,0223383	0,0277551
78,75	0,0078616	0,0954516	0,0875	0,4903926	0,0073053	0,0196268
90	0	0	0	0,5	0	0,0078616

Из табл. 1 видно, что три результата: разность энергий E_1 **(**интеграл $S(t)\cdot\xi(t)$ за Δt_i **)** и E_2 **(**интеграл $S_\Pi(t)\cdot\xi(t)$ за Δt_i**)** $\Delta E_1 = E_1 - E_2 = Y_1 - Y_2$, разность энергий $\Delta E_2 = Y_1 - Y_2$ при φ_{02}=90°, и разность энергий $\Delta E_3 = Y_1 - Y_2$ при φ_{02}=11,25° являются уникальным кодом, однозначно определяющим значение $\varphi_{\xi i}$. Так же результат E_3 однозначно определяет значение $\varphi_{\xi i}$.

Таким образом, имея в заранее подготовленной таблице значения ΔE_1,

ΔE_2 и ΔE_3 или E_3 для всех необходимых $\varphi_{\xi i}$, можно для множителей a=1, B_i=1 и Δt_i=1с определить значение шумовой компоненты отклика коррелятора E_1. Т.к. значения множителей a и B_i обычно неизвестны и $\Delta t_i \neq 1$с, и все значения ΔE_1, ΔE_2, ΔE_3 и E_3 строки таблицы будут отличаться от реальных ΔE_1^*, ΔE_2^* и ΔE_3^* или E_3^* только масштабным множителем χ_i, то значение шумовой компоненты отклика коррелятора с их учётом E_1^* можно получить подбором χ_i:

$$E_1^* = E_1/\chi_i\ , \tag{6}$$

где E_1 – значение, взятое из таблицы 1.

Т.е. значения ΔE_1^*, ΔE_2^*, ΔE_3^* и E_3^* параллельно умножаются на χ_i и сравниваются с ΔE_1, ΔE_2, ΔE_3 и E_3 и изменяя χ_i в заданных пределах, пока не получим значения строки таблицы 1:

$$\Delta E_1 = \chi_i \Delta E_1^*,\ \Delta E_2 = \chi_i \Delta E_2^*,\ \Delta E_3 = \chi_i \Delta E_3^* \text{ и } E_3 = \chi_i E_3^*. \tag{7}$$

Подбор χ_i в настоящее время не является сложной вычислительной задачей, которая может быть решена для определённых скоростей передачи сигналов в реальном масштабе времени.

Определим максимальное значение интервала времени Δt_i, учитывая, что в корреляционной схеме подавление шумов в основном определяется отличием их фазы от фазы опорного колебания. Найдём значение набега фазы за время Δt_i при начальном значении частоты шума $\xi(t)$ ω_B – верхнее значение полосы пропускания тракта и ω_H – нижнее значение полосы пропускания тракта, т.е. когда набег фазы наибольший.

Определим время Δt_i, за котороё энергия $S_i(t)\cdot\xi(t)$ изменится на незначительную величину ε.

1. Пусть за время Δt_i значение частоты шума неизменно. Тогда запишем для верхнего значения ω_B

$$S_i\,(t)\cdot\xi(t)|_{\Delta ti} = 0{,}5A_i\cdot B_i\cdot\{cos[(\omega_B - \omega_0)t + \varphi_{\xi i} - \varphi_0)] - [cos(\omega_B + \omega_0)t + \varphi_{\xi i} + \varphi_0]\}. \tag{8}$$

Значение первого члена суммы (8) – это низкочастотное колебание. После интегрирования в (1) значение второго члена суммы (8) будет стремиться к нулю (и равно нулю при равном количестве положительных и отрицательных полупериодов частоты $\omega_B+\omega_0$).

Число периодов n колебаний для верхнего значения ω_B:

$$n = \omega_B\, t = \omega_0\, t + 2\pi\, l,$$

где l – количество частей периодов ω_0, т.е. значение набега фазы в частях периода (0,5 0,25 0,75 и т.д.), набег фазы l_i =1 соответствует набегу фазы $\psi_i=2\pi$ ($\psi = 2\pi\, l$). Тогда набег фазы для ω_H найдём из:

$$\omega_H\, t = \omega_0\, t - l, \text{ или } \psi = 2\pi\,(\omega_0 - \omega_H)t = \pi\, \Pi\, t.$$

Набег фазы для ω_B:

$$\psi = 2\pi\,(\omega_B - \omega_0)\, t = \pi\, \Pi t.$$

При ψ=11,25° ($\pi/16$) энергия $E_{S(t)\cdot\xi(t)}$ $S_i(t)\cdot\xi(t)$ $=sin(\omega_o t)sin(\omega_o t+\ \pi/16)$ уменьшится относительно ψ=0° на ε<1,93% за Δt_i =1/16Π, а при ψ=22,5° ($\pi/8$) за Δt_i =1/8Π ε<7,62 %. Но, если ψ =78,75°, то $E_{S(t)\cdot\xi(t)}$ уменьшится относительно ψ=67,5° на ε≈50%, однако здесь $E_{S(t)\cdot\xi(t)}$ будет в n >5 раз меньше $E_{S(t)\cdot\xi(t)}$ при ψ=0°.

2. Нетрудно убедиться, что при линейном изменении частоты или при постоянных значениях частот $(\omega_0 - \omega_H)/2$ и $(\omega_0 + \omega_H)/2$:

$$\psi = \pi\ (\omega_0 - \omega_H)t = \pi\ \Pi t/2 \text{ и } \psi = \pi\ (\omega_B - \omega_0)t = \pi\ \Pi t/2.$$

Т.е. здесь за t_i =1/8Π ε<1,93 %, а за Δt_i =1/4Π ε<7,62 %.

Понятно, что чем меньше значение Δt_i тем меньше ε. Т.к. реально частота шума $\xi(t)$ изменяется и флюктуирует обычно не по линейному закону, то значение Δt_i может быть выбрано равным:

$$\Delta t_i \leq 1/(16\Pi ... 32\Pi) \tag{9}$$

Таким образом, выбрав Δt_i согласно (9), получив значения ΔE_1^*, ΔE_2^*, ΔE_3^* и E_3^*, подобрав χ_i и получив значение шумовой компоненты отклика коррелятора, можно получить скорректированный результат $Y_{1\ КОР\ i}$. Сложив эти результаты за время $T_И$, и вычтя из (1), получим скорректированный результат $Y_{1\ ТИ\ КОР}$:

$$Y_{1\ ТИ\ КОР} = Y_1 - \sum_{i=1}^{N} Y_{1\ КОР\ i} \quad . \tag{10}$$

Выводы. 1. Используя три схемы на основе двух корреляторов, с генератором «меандровой копией» $S_\Pi(t)$ опорного сигнала и с генератором опорного гармонического сигнала $S(t)$, при воздействии на сигнал $S(t)$ флуктуационного гауссового шума $\xi(t)$ можно вычислить значения шумовой компоненты отклика коррелятора, кроме случая когда шум и переданный сигнал, рассматриваемые на малом временном интервале Δt_i синфазны или противофазны.

2. Внедрение рассмотренного подхода «очистки» сигнала от шума, для высокоскоростных каналов сдерживается временными затратами на получение значения масштабного множителя χ_i.

3. Погрешность значения шумовой компоненты отклика коррелятора в основном зависит от выбора временного интервала Δt_i, шага дискретизации значений начальной фазы $\varphi_{\xi i}$ шума на временном интервале Δt_i и точности измерений значений ΔE_1^*, ΔE_2^*, ΔE_3^* и E_3^*.

Список литературы: 1. *Брезгунов А.В.* Выбор схемы коррелятора / *А. В. Брезгунов, Н. П. Кириченко* // Зб. наук. праць. – Х. : УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 98. – С. 23-26. 2. Радиотехнические цепи и сигналы : Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника»/ С. И. Баскаков. – 5-е изд.– М.: Высш. шк., 2005. – 462 с.

Поступила в редакцию 15.10.2011